

ارزیابی تأثیر تأخیرات بر عملکرد TBM با استفاده از ماتریس اندرکنش

(مطالعه موردی قطعه دوم تونل انتقال آب کرج - تهران)

مجید تاجیک^{۱*}، امید فروغ^۲

پذیرش مقاله: ۹۲/۰۵/۳۰

دریافت مقاله: ۹۱/۰۴/۲۷

چکیده

در حفاری مکانیزه تونل پیش‌بینی عملکرد TBM به منظور تخمین زمان و هزینه پروژه از اهمیت زیادی برخوردار است. مدل‌های CSM، NTNU و Q_{TBM} به عنوان مدل‌های اصلی پیش‌بینی عملکرد TBM شناخته شده‌اند که در آنها روابطی برای تخمین ضریب بهره‌وری نیز وجود دارد. اگرچه در هر کدام از این مدل‌ها برای تخمین ضریب بهره‌وری از پارامترهای خاصی استفاده شده است ولیکن به طور کلی تأثیر توأم دو یا چند عامل در نظر گرفته نشده است. از طرف دیگر بسیاری از پارامترها وابستگی شدیدی با یکدیگر داشته و ممکن است به طور همزمان بر عملکرد TBM تأثیر بگذارند. بنابراین می‌توان با تشکیل یک ماتریس اندرکنش اثر متقابل پارامترها بر یکدیگر و در نتیجه بر عملکرد TBM را ارزیابی کرد. در این تحقیق ماتریسی با ۲۱ پارامتر مؤثر بر ضریب بهره‌وری تشکیل داده شده است. اندرکنش این پارامترها نشان می‌دهد که نبود خدمات فنی بیشترین تأثیر را در عملکرد TBM دارد. با ثبت مقادیر واقعی فعالیت‌ها و تأخیرات بر حسب ساعت بر متر می‌توان شاخص تأخیرات (DTI) را به دست آورد که این شاخص نسبت عکس با عملکرد TBM داشته و با ضریب همبستگی 0.872 رابطه مستقیم با زمان خالص حفاری تونل دارد.

کلید واژه‌ها: عملکرد TBM، ماتریس اندرکنش، ضریب بهره‌وری، شاخص تأخیرات، کرج

۱. کارشناس ارشد زمین‌شناسی مهندسی، مؤسسه مهندسی مشاور ساحل tajikm1@gmail.com

۲. دکتری مهندسی معدن، سرپرست بخش تونل مهندسی مشاور هندسه پارس omid.frough@gmail.com

۱. مقدمه

زمان‌های توقف ماشین معمولاً شامل زمان تعویض دیسک‌ها، تعمیرات زمان‌بندی شده و موردی، دیوارگیری مجدد، توقف به خاطر نصب نگهداری یا مشکلات ترابری، قطع برق، تعویض شیفت، زمان صرف غذا، تأخیرهای کارکنان و عوامل پیش‌بینی نشده است. تمام این پارامترها برای تعیین ضریب بهره‌وری TBM باید در نظر گرفته شوند (Rostami and Ozdemir, 1993).

۱. مدل‌های پیش‌بینی عملکرد TBM

محققان بسیاری در زمینه عملکرد TBM مطالعه کرده‌اند. برخی از آنها روابطی را بر اساس پارامترهای TBM یا خصوصیات سنگ بکر و یا توده‌سنگ ارائه نموده‌اند. به عنوان مثال Roxborough and Phillip (1975) بر اساس نیروی غلتشی دیسک کاترهای V شکل، Snowdon et al (1982) بر اساس نیروی‌های قائم و غلتشی دیسک کاتر، Sanio (1985) با بررسی تنش کششی مورد نیاز برای تشکیل تراشه، Tarkoy (1975) و Graham (1976) بر اساس مقاومت فشاری تک‌محوری، Farmer and Glossop (1980) بر اساس مقاومت کششی برزیلی، Nelson et al. (1983) و Sato et al. (1991) بر اساس سختی سایشی سنگ‌های رسوبی، Innaurato et al. (1991) با بررسی RSR (عدد طبقه‌بندی ویکهام) و مقاومت فشاری تک‌محوره سنگ بکر، Palmstrom (1994) بر پایه شاخص توده‌سنگ RMI، و Bieniawski (2007) بر اساس قابلیت حفاری توده سنگ روابطی را برای تخمین نرخ نفوذ پیشنهاد نمودند.

گروهی دیگر از محققین از پارامترهای بیشتری استفاده کرده و توانستند عملکرد TBM را تخمین بزنند. Abd Al-Jalil (1998) بر اساس زمان شیفت، زمان کار TBM و طول حفاری شده، Sapigni et al. (2002) با بررسی تغییرات RMR و Q در توده‌سنگ، Yagiz (2007) با بررسی خواص توده‌سنگ، و Hassanpour et al. (2009) با مطالعه مقاومت فشاری

از آغاز حفاری تونل‌ها به روش مکانیزه، پیش‌بینی نرخ پیشروی یکی از مسائل مهم مهندسی بوده است. این کار، مستلزم تخمین نرخ نفوذ و ضریب بهره‌وری است. در این زمینه مطالعاتی نیز صورت گرفته است که نتیجه بسیاری از این مطالعات تنها ارائه مدلی برای پیش‌بینی نرخ نفوذ بوده است. برخی از مدل‌های مورد بررسی، با استفاده از پارامترهای مقاومتی سنگ بکر، روابطی تک پارامتری برای پیش‌بینی نرخ نفوذ ارائه داده‌اند.

در بعضی از این مطالعات علاوه بر نرخ نفوذ، ضریب بهره‌وری نیز در نظر گرفته شده و در نهایت مدلی برای پیش‌بینی نرخ پیشروی ارائه شده است. بهره‌وری پایین در اثر حفاری در شیب و قوس، شرایط نامساعد زمین، مدیریت ضعیف و یا خرابی‌های متناوب ماشین حاصل می‌شود. از طرف دیگر بهره‌وری بالا معمولاً در ساخت تونل‌های مستقیم و کم شیب در شرایط مساعد زمین به همراه مدیریت خوب و تعمیر و نگهداری مناسب به دست می‌آید. البته باید در نظر داشت که اگرچه TBM به منظور انجام حفاری پیوسته ساخته شده است، اما زمان حفاری معمولاً کمتر از ۵۰ درصد زمان کاری آن است (Laughton, 1998). پس برای بالا بردن نرخ پیشروی می‌توان بهره‌وری TBM را افزایش داد به طوری که در صورت ثابت بودن نرخ نفوذ، با افزایش بهره‌وری از ۲۵ به ۳۰ درصد، نرخ پیشروی ۲۰ درصد افزایش می‌یابد (Sharp, 1983). همانطور که بیان شد در بعضی از مدل‌های پیش‌بینی عملکرد TBM روابطی برای تخمین ضریب بهره‌وری نیز ارائه شده است. در هر کدام از این مدل‌ها عوامل متفاوتی شامل شرایط زمین و یا پارامترهای حفاری در نظر گرفته شده است. ولی به طور کلی تأثیر توام دو یا چند عامل نادیده گرفته شده است. از طرف دیگر بسیاری از این پارامترها وابستگی شدیدی با یکدیگر داشته و ممکن است به طور همزمان بر عملکرد TBM تأثیر بگذارند. بنابراین با استفاده از ماتریس اندرکنش می‌توان اثر متقابل پارامترهای زمین و ماشین بر یکدیگر را در نظر گرفت و ارزیابی قابل قبولی از عملکرد TBM ارائه نمود.

خطی که می‌تواند نیروهای مورد نیاز برای برش سنگ و پارامترهای مربوط به آن را اندازه‌گیری کند، بنا شده است (Rostami, et al., 1997) و در آن تأثیر ناپیوستگی‌ها در نرخ نفوذ TBM در نظر گرفته نمی‌شود (Ramezanzadeh, 2002). مدل NTNU پس از شروع حفاری مکانیزه در نروژ توسعه پیدا کرده و با استفاده از اطلاعات جدید به روز شده است. این مدل بر مبنای اطلاعات سیستماتیک ۳۵ پروژه، بیش از ۲۵۰ کیلومتر تونل توسعه یافته است. (Bruland, A., 1998b). مدل Q_{TBM} توسط Barton (1999) به منظور تخمین نرخ نفوذ و نرخ پیشروی TBM و بر اساس سیستم طبقه‌بندی توده‌سنگ Q بنا شده است. تأثیر جهت‌داری ناپیوستگی‌ها، مقاومت فشاری و کششی سنگ بکر، شاخص عمر CLI و درصد کوارتز سنگ و پارامترهای مؤثر اندرکنش بین سنگ و ماشین در آن در نظر گرفته شده است.

در مدل‌های CSM، NTNU و Q_{TBM} روش‌های تخمین ضریب بهره‌وری به صورت‌های مختلفی ارائه شده‌اند. در هر کدام از آن‌ها ممکن است مواردی در نظر گرفته شده باشد که در سایر مدل‌ها در نظر گرفته نشده و یا اهمیت بیشتر یا کمتری داده شده باشد. در جدول ۱ عوامل مؤثر بر ضریب بهره‌وری در مدل‌های CSM، NTNU و Q_{TBM} مقایسه شده‌اند.

جدول ۱. مقایسه عوامل مؤثر بر ضریب بهره‌وری در مدل‌های CSM، NTNU و Q_{TBM} (فروغ و همکاران ۱۳۹۰)

Q_{TBM}	NTNU	CSM	عوامل مؤثر بر بهره‌وری	
اثر توده‌سنگ در Q لحاظ شده است	خیر	(تأثیر ناپیوستگی‌ها)	RQD	شرایط زمین
	خیر	(زمان نصب نگهداری)	RMR	
	خیر	خیر	Q	
	خیر	بله	آب زیرزمینی	
بله (شاخص عمر دیسک)	(تابعی از نرخ نفوذ)	بله	سایندگی سنگ / تعویض دیسک کاتر	
	بله	بله	قوس مسیر تونل	هندسه تونل
خیر	خیر	قطر تونل		
بله	خیر	(تأثیر در لجستیک)	شیب تونل	
خیر	بله	بله	نقشه برداری	مدیریت و پشتیبانی
	(نصب سیستم برق)	بله	لجستیک	
	بله	بله	ترابری	
	بله	خیر	تعمیر و نگهداری TBM	
	بله	خیر	تعمیر و نگهداری Back up	
	خیر	خیر	تعمیرات پیش‌بینی نشده	
خیر	بله	بله		دیوارگیری مجدد

تک‌محوره سنگ بکر و فاصله‌داری ناپیوستگی‌ها روابطی را ارائه نموده‌اند.

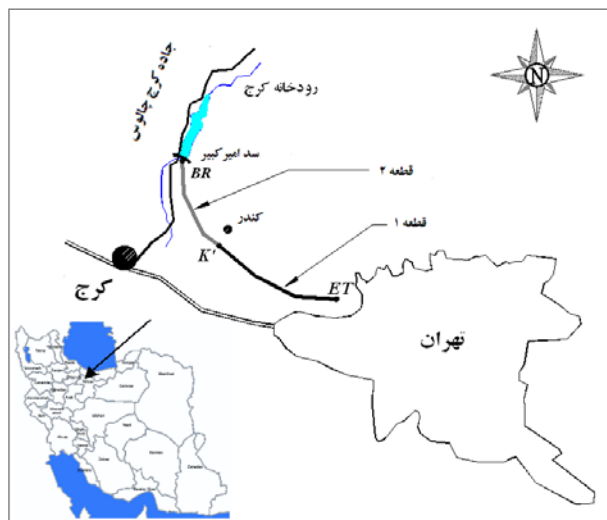
برخی در مطالعه عملکرد TBM از مدل‌سازی عددی استفاده کرده‌اند. (Gong et al. (2004, 2005) با استفاده از این روش تأثیر جهت‌داری و فاصله‌داری درزه‌ها در خردایش سنگ را بررسی کردند. Kim (2004) تأثیر RMR، RQD و آب زیرزمینی بر ضریب بهره‌وری را به روش فازی-لجیک مدل‌سازی نمود. (Frough et al. (2012) نیز تأثیر شرایط توده‌سنگ را با توجه به RMR بر بهره‌وری و توقفات TBM بررسی کردند. (Benardos et al. (2004) با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی تأثیر پارامترهایی مانند RMR، UCS، RQD و همچنین ضریب پایداری، شرایط آب زیرزمینی و عمق تونل بر نرخ پیشروی TBM را تخمین زد.

امروزه مدل‌های CSM، NTNU و Q_{TBM} به عنوان مدل‌های اصلی پیش‌بینی عملکرد TBM شناخته شده‌اند. این مدل‌ها مبنای متفاوتی دارند و معمولاً در یک پروژه دو روش در کنار هم به کار می‌روند. مدل CSM یک مدل تئوری - تجربی است که اولین نسخه آن توسط Ozdemir et al. (1977) ارائه شده است (نقل از Rostami and Ozdemir, 1993). این مدل بر مبنای بانک اطلاعاتی حاصل از آزمایش بزرگ مقیاس برش

Zhang et al., al., 2008; Zare naghadehi et al., 2012
2004, 2005, Sadeghi and Rasouli, 2005. یعقوبی، ۱۳۸۹، یآوری
و همکاران، ۱۳۹۰). در این تحقیق عملکرد TBM در قطعه
دوم تونل انتقال آب کرج - تهران و عوامل تأثیرگذار بر آن با
استفاده از رویکرد سیستمی مورد بررسی قرار گرفته است.

۳. معرفی پروژه

تونل انتقال آب از سد امیرکبیر به تصفیه‌خانه شماره ۶ تهران با
طول حدود ۳۰ کیلومتر با ظرفیت ۱۶ مترمکعب در ثانیه،
بخشی از پروژه‌ای است که با هدف آبرسانی به غرب تهران
تعریف شده است. این تونل با استفاده از D.S.TBM با قطر
حفاری ۴/۶۶۵ متر اجرا می‌شود. قطر نهایی آن ۳/۹ متر
می‌باشد و پوشش نهایی تونل به وسیله قطعات پیش‌ساخته
بتنی (۵ قطعه + کلید) با ضخامت ۲۵ سانتی‌متر تأمین شده
است. هدف از احداث این تونل، انتقال آب رودخانه کرج با
دبی ۱۶ متر مکعب در ثانیه به صورت جریان آزاد است.
موقعیت این تونل در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی تونل انتقال آب کرج - تهران
(فروغ و همکاران ۱۳۹۰)

قطعه اول این تونل از تصفیه‌خانه شماره ۶ تا حوالی روستای
کندر (قطعه "K-ET")، با طول حدود ۱۶۰۴۲ اجرا شده است.

۲. کاربرد سیستم‌های مهندسی سنگ (RES)

اگرچه پارامترهای مؤثر بر کارایی TBM در مدل‌های پیش‌بینی
عملکرد TBM مطالعه شده و با استفاده از روابط ارائه شده در
آنها می‌توان درجه اهمیت این پارامترها و میزان تأثیر آن بر
ضریب بهره‌وری را تخمین زد. ولیکن همانطور که بیان شد در
این مدل‌ها تخمین ضریب بهره‌وری به صورت‌های مختلفی
ارائه شده و پارامترهای متفاوتی در نظر گرفته شده‌اند. از طرف
دیگر بسیاری از پارامترها وابستگی شدیدی با یکدیگر داشته و
ممکن است به طور همزمان بر عملکرد TBM تأثیر بگذارند.
پس به منظور تعیین عملکرد TBM تفکیک پارامترهای
تأثیرگذار و شناخت نحوه تأثیر هر پارامتر بر یکدیگر ضرورت
دارد.

بدین منظور در این تحقیق هر فعالیت و عدم فعالیت (تأخیر یا
توقف) پرسنل یا TBM به عنوان یک پارامتر تأثیرگذار بر
ضریب بهره‌وری انتخاب شده و سپس با تشکیل یک ماتریس
اثر متقابل پارامترها بر یکدیگر و در نتیجه بر عملکرد TBM
ارزیابی می‌شود. این روش برگرفته از رویکرد سیستم‌های
مهندسی سنگ (RES) هادسون است که به عنوان یک روش
سیستمی در تحلیل و رده‌بندی پروژه‌های مهندسی سنگ مطرح
است (Hudson, 1992).

در این رویکرد ماتریس‌های اندرکنش ابزاری قوی هستند که
تأثیر متقابل پارامترهای مؤثر بر یکدیگر را در مقیاسی برابر
می‌سنجند. معمولاً ماتریس‌ها به منظور جمع‌آوری ضرایب
مجزا استفاده شده و اندرکنش بین درایه‌ها را برجسته می‌سازند
(Hudson and Harrison, 1997). همچنین در شناسایی
پارامترهای بحرانی، مسیرهای تأثیرگذار، حلقه‌های برگشتی و
ارزیابی تکنیک‌های انتخابی مهندسی از ماتریس اندرکنش
استفاده می‌شود. در ماتریس اندرکنش پارامترهای مؤثر روی
قطر اصلی ماتریس قرار می‌گیرند و اندرکنش پارامترها با
یکدیگر بر حسب آن با کدگذاری، در عناصر غیرقطری
ماتریس مشخص می‌شود.

محققین بسیاری از روش RES جهت بررسی مسائل مهندسی
سنگ استفاده کرده‌اند (Rozos et al., Ceryan and Ceryan, 2008).

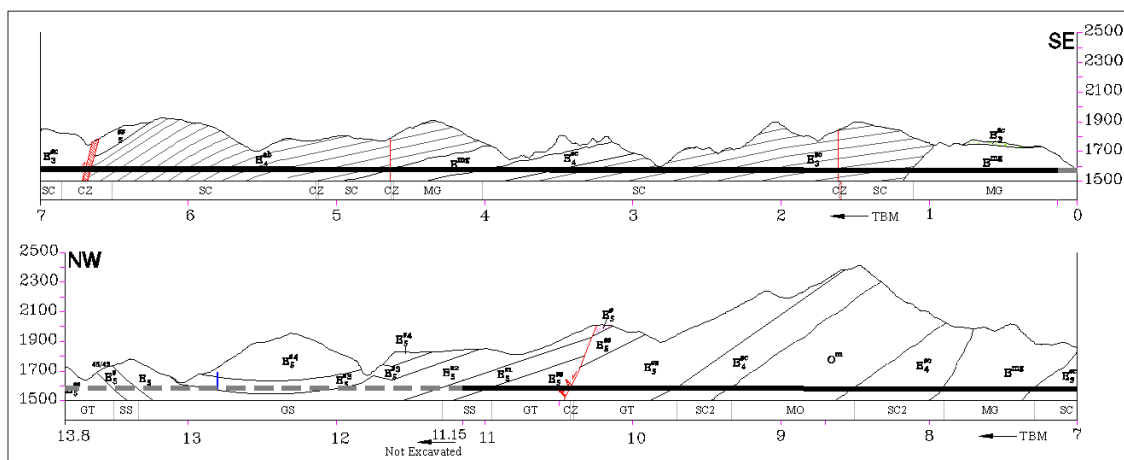
برگیرنده مجموعه‌های رسوبی مختلفی از سازند کرج به سن ائوسن پسین تا میانی است (Gansser and Huber, 1962). سازند کرج در مسیر تونل به چهار بخش توف میانی، شیل آسارا، توف بالایی و شیل کندوان تقسیم می‌شود که هر بخش واحدهای سنگی مشخصی دارد. از نظر سنگ‌شناسی واحدهای سنگی مسیر تونل شامل تناوب‌هایی از توف، ماسه سنگ، سیلت‌استون، گدازه و آگلومرا است که در قالب طبقات رسوبی چین‌خورده دیده می‌شوند (مشاور ساحل، ۱۳۸۹). معمولاً توده‌های نفوذی و دایک‌های آذرین از جنس دیوریت و گابرو در میان واحدهای رسوبی دیده می‌شوند (شکل ۲).

اغلب واحدهای سنگی در مسیر تونل به دلیل بافت ریزدانه از تراوایی ضعیفی برخوردار هستند و در کل از نظر تشکیلی مخازن آب زیرزمینی ارزش هیدروژئولوژیکی چندانی ندارند (مشاور ساحل، ۱۳۸۸).

قطعه دوم تونل انتقال آب کرج (قطعه BR-K'')، با طول ۱۳۴۴۰ متر در حال اجراست که تا آخر آبان ۱۳۹۰ حدود ۱۱ کیلومتر آن اجرا شده است. در این تحقیق علاوه بر اطلاعات مربوط به قطعه دوم تونل، از گزارش‌های روزانه حفاری، نقشه‌های چون ساخت زمین‌شناسی و داده‌های جمع‌آوری شده در زمان اجرای قطعه اول پروژه نیز در انجام تحلیل‌ها استفاده شده است.

۴. زمین‌شناسی مسیر تونل

از دیدگاه زمین‌شناختی محدوده تونل در دامنه جنوبی البرز مرکزی قرار دارد. البرز مرکزی یک ایالت ساختاری با ویژگی‌های منحصر به فرد و پیچیده است که در بخش جنوبی آن پهنه کرج-سولقان قرار دارد (SCE, 2009). این پهنه متعلق به زون ترشیری جنوبی است و از دیدگاه چینه‌شناسی در



شکل ۲. پروفیل زمین‌شناسی مسیر تونل (SCE 2009; SCE 2009-2011)

دارد. معمولاً این پارامترها با توجه به شرایط زمین‌شناسی مسیر تونل (وجود گاز، آب زیرزمینی، روباره و ...)، نوع ماشین حفار (باز، تک سپر، دو سپر و ...)، تأمین تجهیزات، ابعاد و طول تونل، اهداف پروژه (انتقال آب یا راه) متفاوت است. در پروژه تونل انتقال آب کرج - تهران علاوه بر عوامل فوق؛ موقعیت جغرافیایی پروژه و راه‌های دسترسی به تونل نیز در عملکرد ماشین حفاری مؤثر هستند.

۵. بررسی تأخیرات در ماتریس اندرکنش

در حفاری مکانیزه به منظور پیش‌بینی عملکرد ماشین حفاری نیاز است که تمامی پارامترهای مؤثر بر نرخ نفوذ و ضریب بهره‌وری بررسی شوند. در روش رویکرد سیستمی اهمیت شناسایی پارامترهای مؤثر بر عملکرد TBM دوچندان می‌شود. زیرا علاوه بر درک نحوه تأثیر هر پارامتر بر عملکرد ماشین حفاری، چگونگی ارتباط آنها در یک ماتریس نیز ضرورت

در این پروژه مطابق با جدول زمان‌بندی، فعالیت ماشین حفاری و پرسنل برای ۳ شیفت کاری در ۷ روز از هفته برنامه‌ریزی و اجرا می‌شود. در هر شیفت کاری تمام عواملی که منجر به تأخیر یا توقف پیشروی ماشین شود به تفکیک و بر حسب دقیقه ثبت شده است. سپس به منظور سهولت در تحقیق ۲۱ پارامتر مؤثر بر ضریب بهره‌وری انتخاب شده به نحوی که هر پارامتر می‌تواند بیانگر گروهی از فعالیت‌ها یا تأخیرات مشابه باشد (جدول ۲).

جدول ۲. توصیف پارامترهای مؤثر بر ضریب بهره‌وری در حفاری مکانیزه تونل

شماره	نام پارامتر	توصیف فعالیتها و تأخیرات در هر پارامتر
P1	نصب سگمنت، جابجایی	نصب یک رینگ کامل؛ جابجایی ماشین حفاری
P2	تعمیر و نگهداری	بازدید مخازن، سنسورها و گیج‌ها + گریس کاری + روغن کاری + کنترل ادوات دوار
P3	بازدید کاترهد	بازدید دیسک کاترها؛ تمیز کاری و جوشکاری کاترهد؛
P4	تعویض کاترها	تعویض دیسک کاتر فرسوده و نصب دیسک جدید
P5	نقشه برداری	جابجایی و نصب ایستگاه نقشه برداری؛ مشکلات سیستم راهبری ماشین حفاری (VMT)
P6	آب زیرزمینی	توقف و یا تأخیر حفاری به دلیل هجوم آب از سینه کار
P7	چسبندگی کانی‌های رسی	وجود مصالح رسی در سینه کار؛ چسبیدن مصالح به کاترهد و باکتها
P8	سایندگی توده سنگ	برخورد به سنگهای سخت و کوارتز دار
P9	سینه کار مختلط	تنوع لیتولوژی و وجود توده سنگ متفاوت در سینه کار
P10	ناپایداری و ریزش	کیفیت پایین توده سنگ و ریزش مصالح در حین حفاری
P11	نبود خدمات فنی	قطع آب، برق، هوای فشرده و سیستم تهویه؛ لوله کشی و کابل کشی
P12	کمبود قطعات، مواد و مصالح	تأخیر در تامین قطعات هیدرومکانیکی و الکتریکی؛ سیمان و ماسه؛ بولت و...
P13	نقص هیدرومکانیکی	تعمیرات هیدرومکانیکی ماشین حفاری و سیستم پشتیبان
P14	نقص الکتریکی	تعمیرات الکتریکی ماشین حفاری و سیستم پشتیبان
P15	تأخیر سیستم ترابری	عدم امکان بارگیری به دلیل تأخیر ورود قطار؛ خارج شدن قطار از ریل؛ حوادث پرتال؛ نوار نقاله
P16	تعویض شیفت	تأخیر انتقال پرسنل؛ عدم حضور افراد در تونل
P17	تزریق دوغاب و پی گراول	تأخیر عملیات تزریق پرکننده؛ مشکلات پمپ تزریق دوغاب و پی گراول
P18	شستشو و تمیزکاری سیستم پشتیبان	شستشو سگمنت فیدر و شیلد پستی؛ لجن برداری سیستم پشتیبان
P19	استقرار لوکوموتیو	ریل گذاری؛ مشکلات کارموور؛ باربرداری (سگمنت، لوله، قطعات)
P20	بازدیدکنندگان (ایمنی، کارفرما)	صرف غذا، بازدید بهداشت و ایمنی، حضور کارفرما و ...
P21	زمان حفاری	میانگین زمان صرف شده در هر مرحله حفاری

صورت گرفته است. با این توضیح که در طول پروژه هرچه تأثیر یک پارامتر بیشتر باشد رتبه بالاتری را کسب می‌کند. در پایان جهت کدگذاری ماتریس اندرکنش پنج کلاس ۰ تا ۴ معرفی شده است (جدول ۳).

در روش ماتریسی بعد از انتخاب تعداد پارامترهای مؤثر، می‌بایست برای هر پارامتر نمره‌ای اختصاص یابد. با رتبه‌بندی پارامترها می‌توان مدیریت بهتری بر پروژه به منظور افزایش ضریب بهره‌وری و در نتیجه عملکرد TBM داشت. رتبه‌بندی درایه‌های ماتریس با توجه به شدت تأثیر پارامترها بر یکدیگر

پارامترهای دیگر موجود در سیستم است و به عکس هر ستون عبوری از آن درایه نشان دهنده تأثیر پارامترهای دیگر سیستم بر روی آن می باشد. بنابراین ستون اثرات متقابل که از P21 عبور می کند نشان می دهد که چگونه فعالیتها و تأخیرات بر زمان حفاری تأثیر می گذارد. به همین شکل سطر عبوری از این درایه نشان دهنده اثر زمان حفاری بر سایر پارامترها است. لازم به توضیح است که در این ماتریس تمامی پارامترهای ۱ تا ۲۰ اثر منفی بر روی P21 دارد، بدین معنی که افزایش زمان هر پارامتر منجر به کاهش زمان حفاری و در نتیجه کاهش عملکرد TBM می شود.

مبنای کدگذاری ماتریس فوق روش تجربی است که با استفاده از پرسشنامه و بررسی نظر کارشناسان خبره به دست آمده است و نتیجه نهایی آن مطابق با شکل ۳ کد گذاری شده است. در این ماتریس از تجربیات حفاری در قطعه اول تونل مورد مطالعه با طول ۱۶۰۴۲ متر نیز استفاده شده است.

جدول ۳. توصیف رتبه های قراردادی در ماتریس اندرکنش

کد	توصیف اندرکنش	درصد
۰	درایه هیچ گاه بر درایه دیگر تأثیر ندارد.	۰
۱	درایه بسیار کم بر درایه دیگر تأثیر دارد.	۲۵
۲	درایه کمی بر درایه دیگر تأثیر دارد.	۵۰
۳	درایه زیاد بر درایه دیگر تأثیر دارد.	۷۵
۴	درایه بسیار زیاد بر درایه دیگر تأثیر دارد.	۱۰۰

به منظور درک چگونگی اثرات متقابل پارامترها و تأثیر آن بر عملکرد ماشین حفاری ۲۰ پارامتر انتخاب شده همراه با پارامتر زمان حفاری P21 در امتداد قطر ماتریس اندرکنش قرار می گیرند. P21 در واقع بیانگر ضریب بهره روی است که به عنوان پارامتری جهت تعیین عملکرد ماشین حفاری مورد مطالعه است (شکل ۳).

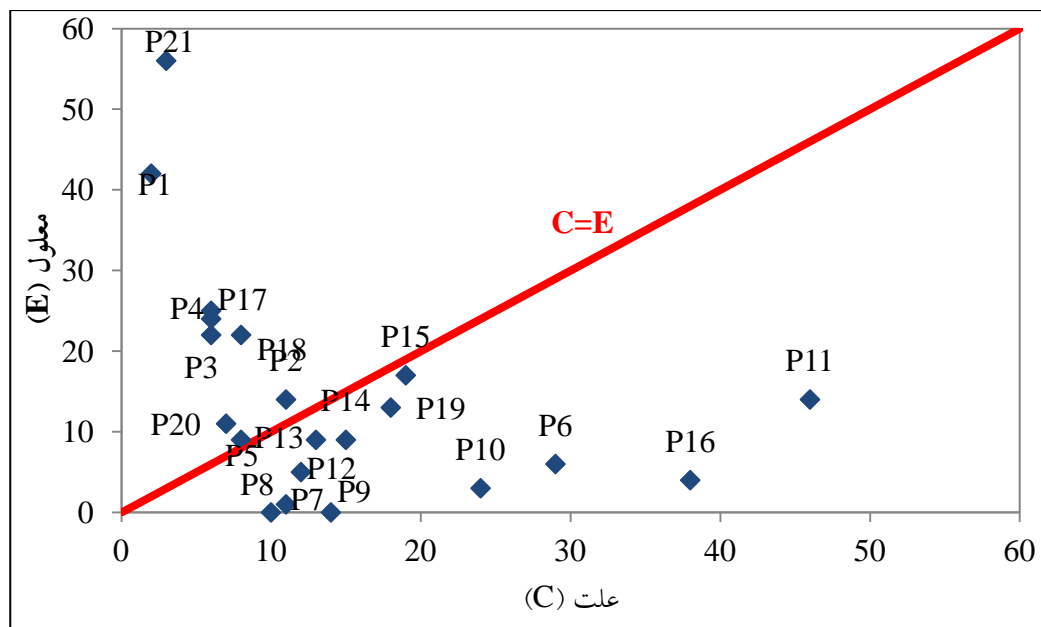
با توجه به نحوه ساخته شدن ماتریس واضح است که هر سطر عبوری از یک درایه نشان دهنده تأثیر آن درایه بر تمام

ردیف	ماتریس اندرکنش																				ردیف	توضیحات	
	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11	P12	P13	P14	P15	P16	P17	P18	P19	P20			P21
۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	P1	نصب سگمنت، جابجایی
۲	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	P2	تعمیر و نگهداری
۳	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	P3	بازدید کاترهد
۴	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	P4	تعویض کاترها
۵	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	P5	نقشه برداری
۶	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	P6	آب زیرزمینی
۷	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	P7	چسبندگی کانیهای رسی
۸	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	P8	سایندگی توده سنگ
۹	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	P9	سینه کار مختلط
۱۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	P10	ناپایداری و ریزش
۱۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	P11	نبود خدمات فنی
۱۲	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	P12	کمبود قطعات، مواد و مصالح
۱۳	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	P13	نقص هیدرومکانیکی
۱۴	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	P14	نقص الکتریکی
۱۵	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	P15	تاخیر سیستم ترابری
۱۶	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	P16	تعویض شیفت
۱۷	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	P17	توزیع دوغاب و پی گراول
۱۸	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	P18	نشستشو و تمیزکاری سیستم پشتیبان
۱۹	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	P19	استقرار لوکوموتیو
۲۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	P20	بازدیدکنندگان (ایمنی، کارفرما)
۲۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	P21	زمان حفاری

شکل ۳. کد گذاری ماتریس اندرکنش متشکل از ۲۱ پارامتر مؤثر در حفاری به روش معدل گیری از پرسشنامه ها

مجموع تمام کدهای سطر با عنوان علت C و مجموع تمام کدهای ستون به عنوان معلول E برای هر پارامتر محاسبه شده است (شکل ۳). با انتقال مقادیر علت و معلول بر روی نمودار تفاوت میان اثرات متقابل پارامتر و سیستم و کم و زیاد بودن این اثر متقابل نشان داده می‌شود (شکل ۴).

بعد از کدگذاری ماتریس جمع عددی هر سطر و ستون محاسبه شده و به ترتیب به نام علت (Cause) و معلول (Effect) معرفی می‌گردد. بنابراین C معرف نحوه اثر یک پارامتر بر سیستم و E نشانگر تأثیری است که سیستم در واکنش به آن پارامتر دارد (Khalukakei, et al., 2009).



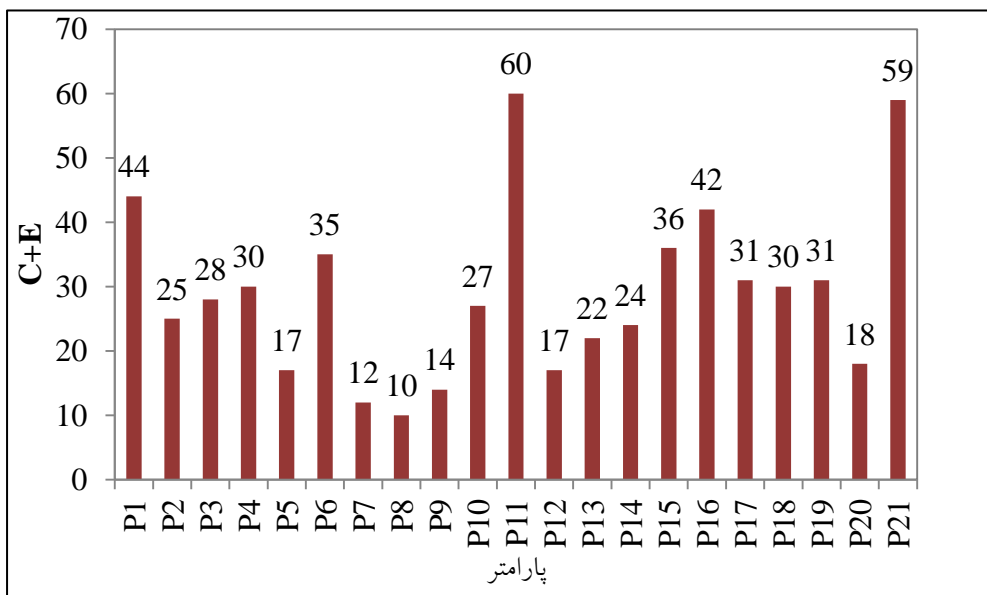
شکل ۴. نمایش مقادیر علت و معلول در پارامترهای انتخاب شده

بیشترین تسلط را بر سیستم دارند پس آنها می‌توانند منجر به تغییرات چشمگیری در زمان سایر فعالیت‌ها شوند. با به دست آوردن مجموع علت و معلول (C+E) برای هر پارامتر می‌توان هیستوگرام شدت اندرکنش را رسم کرد (شکل ۵).

انتخاب C+E به عنوان فاکتور تمایز بین پارامترها به دلیل تمرکز بر نقش اندرکنش یک سیستم بوده است. به طور کلی هرچه اندرکنش یک سیستم بیشتر باشد نمی‌توان انتظار عملکرد مناسبی از ماشین حفاری داشت. زیرا شانس بیشتری وجود دارد که تغییر کوچک در یک پارامتر تا حد قابل توجهی بر رفتار سیستم تأثیر بگذارد. بنابراین در این شرایط احتمال افت عملکرد ماشین بیشتر می‌باشد.

در شکل ۴ قطر نمودار علت - معلول مکان هندسی C=E است که در طول این قطر مقدار C+E افزایش می‌یابد. نقاطی که در قسمت پایین سمت راست نمودار قرار می‌گیرند از مقدار C-E بزرگتری برخوردارند و نشانگر پارامترهایی است که بر روی سیستم تسلط دارند و به عکس پارامترهایی که تحت تأثیر سیستم می‌باشند در قسمت بالا سمت چپ نمودار قرار می‌گیرند و مقادیر C-E کوچکتری دارند.

نمودار علت - معلول قادر است نقش هر پارامتر در عملکرد ماشین حفاری و اثرات متقابل سودمند و غیرسودمند را مشخص کند. به عنوان مثال نمودار شکل ۴ نشان می‌دهد که پارامترهای حفاری P21، جابجایی و سگمنت‌گذاری P1 کاملاً تحت تأثیر سیستم بوده بنابراین تأثیر کمی بر سایر فعالیت‌ها و تأخیرات ماشین دارند. در عوض P11، P16 و P6 یعنی نبود خدمات فنی، تعویض شیفت و آب زیرزمینی به ترتیب



شکل ۵. شدت اندرکنش پارامترهای حفاری مکانیزه تونل

تقریباً مساوی تقسیم و وضعیت حفاری در هر بخش مقایسه شده است (جدول ۴). سپس در هر بخش از تونل، زمان واقعی تأخیرات ثبت شده و به منظور یکسان‌سازی داده‌ها، مطابق با جدول ۵ ارزش هر پارامتر بر حسب ساعت بر متر نشان داده شده است.

با توجه به اینکه زمان حفاری (P21) شاخصی برای سنجش عملکرد ماشین حفاری محسوب می‌شود. پس مقدار واقعی آن بر خلاف سایر پارامترها تأثیر مثبت بر عملکرد دارد بنابراین با حذف آن می‌توان کاهش عملکرد TBM در اثر اندرکنش تأخیرات و مشکلات حفاری را تعیین کرد. اگرچه زمان واقعی برخی از پارامترها صفر می‌باشد ولیکن به دلیل اینکه همواره $C+E > 0$ است بنابراین تمامی پارامترهای P1 تا P20 بر زمان حفاری تأثیرگذار هستند و امکان حذف هیچ پارامتری وجود ندارد.

هیستوگرام شکل ۵ نشان می‌دهد که پارامترهای ۱۱، ۲۱، ۱ و ۱۶ یعنی به ترتیب نبود خدمات فنی، زمان حفاری، سگمنت‌گذاری و تعویض شیفت بیشترین اندرکنش را در سیستم داشته و این بدان معنی است که تغییر کوچکی در این پارامترها تا حد قابل توجهی بر ضریب بهره‌وری تأثیر خواهد گذاشت. به وضوح ثابت شده است که عدم تأمین برق و آب مورد نیاز ماشین حفاری منجر به توقف تمامی فعالیت‌ها می‌شود. پس به منظور افزایش عملکرد، مدیریت بهتر P11 در اولویت می‌باشد.

۶. تأثیر شاخص تأخیرات بر عملکرد TBM

اگرچه شدت اندرکنش نسبی هر پارامتر به روش قضاوت مهندسی به دست آمده است ولیکن به منظور تعیین رابطه مناسب این رویکرد با عملکرد TBM لازم است که مقادیر واقعی هر پارامتر بیان شود. با توجه به شرایط تقریباً یکسان توده‌سنگ در مسیر تونل، متراژ حفاری شده تونل به ۱۱ بخش

جدول ۴. مقایسه وضعیت حفاری TBM در هر بخش از تونل

نام	متر از شروع	متر از نهایی	طول مسیر (متر)	کارکرد ماشین (روز)	تعطیلی کارگاه (روز)	مدت ساخت تونل (روز)
بخش اول	۱۳۳,۰۱	۱۱۴۲,۹۰	۱۰۰۹,۸۹	۱۰۷	۴۲	۱۴۹
بخش دوم	۱۱۴۲,۹۰	۲۱۴۲,۷۶	۹۹۹,۸۶	۸۵	۱	۸۶
بخش سوم	۲۱۴۲,۷۶	۳۱۴۱,۹۰	۹۹۹,۱۴	۴۶	۰	۴۶
بخش چهارم	۳۱۴۱,۹۰	۴۱۳۴,۵۶	۹۹۲,۶۶	۴۷	۱	۴۸
بخش پنجم	۴۱۳۴,۵۶	۵۱۲۴,۲۱	۹۸۹,۶۵	۴۴	۰	۴۴
بخش ششم	۵۱۲۴,۲۱	۶۱۳۵,۸۱	۱۰۱۱,۶۰	۴۶	۳	۴۹
بخش هفتم	۶۱۳۵,۸۱	۷۱۳۲,۵۷	۹۹۶,۷۶	۴۹	۱	۵۰
بخش هشتم	۷۱۳۲,۵۷	۸۱۳۱,۸۴	۹۹۹,۲۷	۸۵	۴	۸۹
بخش نهم	۸۱۳۱,۸۴	۹۱۳۶,۴۵	۱۰۰۴,۶۱	۸۴	۰	۸۴
بخش دهم	۹۱۳۶,۴۵	۱۰۱۴۸,۲۳	۱۰۱۱,۷۸	۵۱	۰	۵۱
بخش یازدهم	۱۰۱۴۸,۲۳	۱۱۱۴۹,۸۴	۱۰۰۱,۶۱	۵۳	۲	۵۵
مجموع			۱۱۰۱۶,۸۳	۶۹۷	۵۴	۷۵۱

جدول ۵. مقادیر واقعی پارامترهای مؤثر بر عملکرد ماشین حفاری در هر بخش از تونل

پارامتر	علت (C)	معلول (E)	C+E	تاخیرات حفاری در هر بخش (ساعت بر متر)										
				۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱
۰۱	۰	۴۰	۴۰	۰.۳۳۲	۰.۳۹۶	۰.۳۱۳	۰.۲۷۸	۰.۲۶۲	۰.۲۴۳	۰.۲۵۰	۰.۲۷۲	۰.۲۳۳	۰.۲۱۶	۰.۲۱۲
۰۲	۷	۱۴	۲۱	۰.۵۴۶	۰.۷۶۸	۰.۱۶۶	۰.۱۸۵	۰.۱۷۷	۰.۱۷۱	۰.۱۹۷	۰.۲۳۶	۰.۵۶۱	۰.۱۴۳	۰.۱۷۹
۰۳	۲	۲۲	۲۴	۰.۱۹۲	۰.۱۵۵	۰.۱۴۷	۰.۱۴۱	۰.۱۴۱	۰.۱۴۱	۰.۱۲۵	۰.۱۲۹	۰.۱۷۳	۰.۱۱۹	۰.۱۱۹
۰۴	۲	۲۴	۲۶	۰.۰۴۳	۰.۰۵۹	۰.۰۳۷	۰.۰۷۳	۰.۰۳۲	۰.۰۳۸	۰.۰۴۸	۰.۰۹۸	۰.۰۷۵	۰.۰۵۰	۰.۰۹۵
۰۵	۴	۹	۱۳	۰.۰۲۵	۰.۰۳۳	۰.۰۲۷	۰.۰۳۲	۰.۰۱۵	۰.۰۲۵	۰.۰۲۹	۰.۰۲۸	۰.۰۲۳	۰.۰۳۵	۰.۰۲۸
۰۶	۲۷	۶	۳۳	۰.۰۰۰	۰.۰۰۰	۰.۰۰۰	۰.۰۰۰	۰.۰۰۰	۰.۰۰۰	۰.۰۰۰	۰.۰۰۷	۰.۰۰۱	۰.۰۰۰	۰.۰۰۲
۰۷	۱۱	۱	۱۲	۰.۰۰۰	۰.۰۰۰	۰.۰۰۰	۰.۰۰۰	۰.۰۰۰	۰.۰۰۰	۰.۰۰۰	۰.۰۰۰	۰.۰۰۰	۰.۰۰۰	۰.۰۰۰
۰۸	۶	۰	۶	۰.۰۰۰	۰.۰۰۰	۰.۰۰۰	۰.۰۰۰	۰.۰۰۰	۰.۰۰۰	۰.۰۰۰	۰.۰۰۰	۰.۰۰۰	۰.۰۰۰	۰.۰۰۰
۰۹	۱۰	۰	۱۰	۰.۰۰۰	۰.۰۰۰	۰.۰۰۰	۰.۰۰۰	۰.۰۰۰	۰.۰۰۰	۰.۰۰۰	۰.۰۰۰	۰.۰۰۰	۰.۰۰۰	۰.۰۰۰
۰۱۰	۲۰	۳	۲۳	۰.۰۰۱	۰.۰۰۲	۰.۰۰۳	۰.۰۰۳	۰.۰۰۱	۰.۰۰۱	۰.۰۰۲	۰.۰۰۲	۰.۰۰۲	۰.۰۰۲	۰.۰۰۰
۰۱۱	۴۲	۱۴	۵۶	۰.۰۹۱	۰.۰۵۱	۰.۰۵۷	۰.۰۶۹	۰.۰۵۴	۰.۰۹۷	۰.۱۲۶	۰.۰۷۸	۰.۰۶۵	۰.۱۲۲	۰.۱۰۸
۰۱۲	۱۲	۵	۱۷	۰.۰۳۳	۰.۰۱۵	۰.۰۱۰	۰.۰۰۸	۰.۰۰۷	۰.۰۰۱	۰.۰۰۲	۰.۰۰۲	۰.۰۰۱	۰.۰۰۱	۰.۰۰۱
۰۱۳	۹	۹	۱۸	۰.۰۵۰	۰.۰۴۴	۰.۰۴۰	۰.۰۰۹	۰.۰۰۶	۰.۰۱۵	۰.۰۱۵	۰.۰۱۷	۰.۰۱۶	۰.۰۱۶	۰.۰۱۸
۰۱۴	۱۱	۹	۲۰	۰.۰۱۷	۰.۰۱۹	۰.۰۳۶	۰.۰۰۹	۰.۰۰۴	۰.۰۲۲	۰.۰۲۱	۰.۰۱۵	۰.۰۱۸	۰.۰۱۳	۰.۰۱۶
۰۱۵	۱۵	۱۷	۳۲	۰.۶۲۲	۰.۱۷۳	۰.۱۵۳	۰.۲۳۹	۰.۱۷۲	۰.۲۵۳	۰.۲۸۶	۰.۲۷۸	۰.۱۶۵	۰.۱۴۳	۰.۱۶۴
۰۱۶	۳۴	۴	۳۸	۰.۱۶۷	۰.۱۴۵	۰.۰۳۶	۰.۰۵۴	۰.۰۵۲	۰.۰۷۴	۰.۰۶۱	۰.۲۲۵	۰.۰۸۶	۰.۰۷۲	۰.۰۸۳
۰۱۷	۶	۲۴	۳۰	۰.۱۶۶	۰.۰۵۷	۰.۰۴۴	۰.۰۳۳	۰.۰۷۲	۰.۰۵۲	۰.۰۱۱	۰.۰۸۳	۰.۰۱۹	۰.۰۱۵	۰.۰۱۲
۰۱۸	۸	۲۲	۳۰	۰.۰۰۵	۰.۰۷۰	۰.۰۰۴	۰.۰۰۵	۰.۰۰۶	۰.۰۱۳	۰.۰۰۴	۰.۰۸۶	۰.۰۳۹	۰.۰۰۹	۰.۰۰۴
۰۱۹	۱۴	۱۳	۲۷	۰.۰۶۰	۰.۰۷۲	۰.۰۳۲	۰.۰۵۰	۰.۰۵۳	۰.۰۴۴	۰.۰۶۱	۰.۰۵۲	۰.۰۱۹	۰.۰۴۷	۰.۰۴۸
۰۲۰	۷	۱۱	۱۸	۰.۰۵۰	۰.۰۳۲	۰.۰۰۵	۰.۰۲۲	۰.۰۰۵	۰.۰۰۲	۰.۰۰۶	۰.۲۲۵	۰.۰۹۶	۰.۰۰۱	۰.۰۱۳
				۷۱.۴۸	۵۹.۳۴	۳۴.۴۲	۳۷.۷۲	۳۴.۲۴	۳۹.۱۳	۳۹.۱۳	۵۷.۰۳	۴۴.۷۵	۳۳.۰۵	۳۵.۱۹
				۱۲.۲۴	۱۵.۳۳	۲۵.۸۶	۲۳.۳۷	۲۲.۱۷	۲۱.۲۳	۲۱.۰۵	۱۹.۳۱	۲۵.۷۰	۳۱.۷۷	۲۸.۸۲

شاخص تاخیرات (ساعت بر متر)

ضریب بهره وری (%)

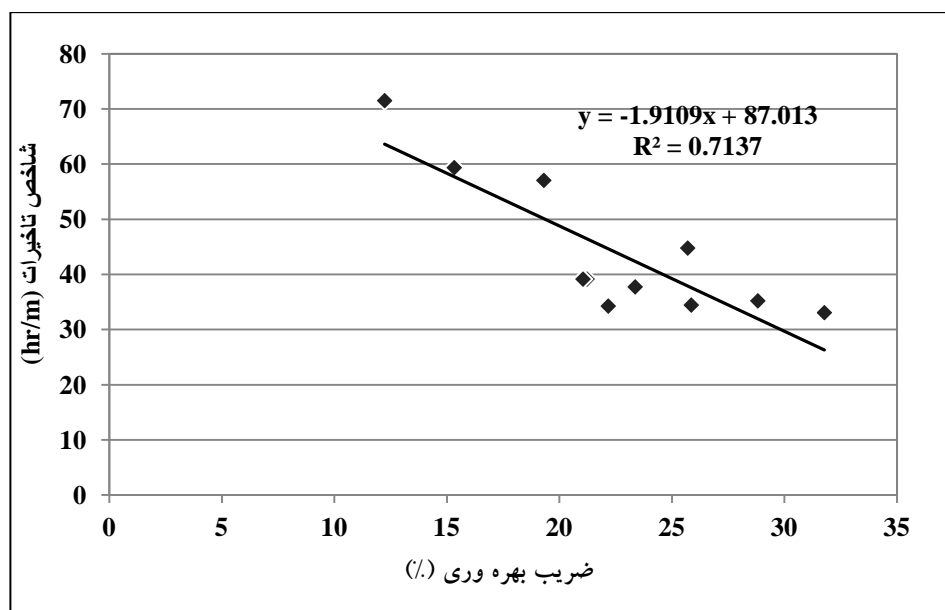
بنابراین انتظار می‌رود که با افزایش آن ضریب بهره‌وری و در نتیجه عملکرد TBM کاهش یابد. همانطور که در شکل ۶ ملاحظه می‌شود در این پروژه DTI وابستگی قابل قبولی با ضریب بهره‌وری دارد که مقدار ضریب همبستگی تحت تأثیر نحوه ارزش‌گذاری درایه‌های ماتریس و درصد همپوشانی فعالیت‌ها و تأخیرات قرار دارد. اثر همپوشانی فعالیت‌ها و تأخیرات در این تحقیق بسیار بارز است زیرا D.S.TBM به گونه‌ای طراحی شده است که توانایی انجام چندین فعالیت همزمان با حفاری را دارد.

در این پروژه شاخص تأخیرات (DTI) Down Time Index بر حسب ساعت بر متر از رابطه ۲ به دست می‌آید. این شاخص میزان اهمیت اندرکنش تأخیرات حفاری در کاهش عملکرد TBM را نشان می‌دهد.

(۲)

$$DTI_j = \sum_{j=1}^{20} [(C + E) * P_j]$$

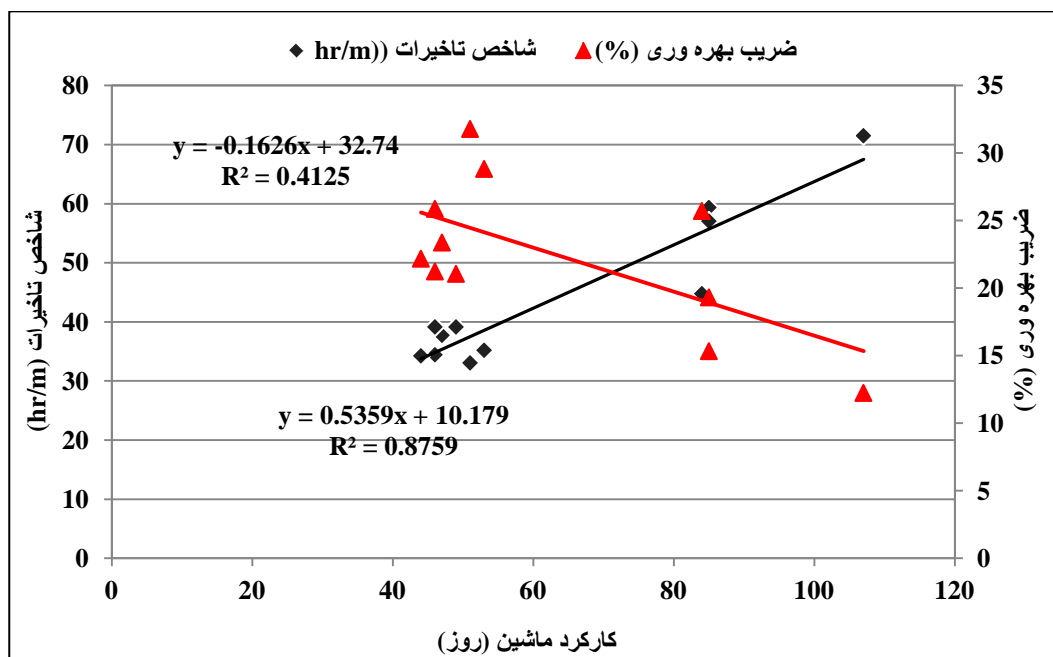
در این رابطه P_i زمان واقعی هر یک از تأخیرات بر حسب ساعت بر متر و DTI_j شاخص تأخیرات در هر بخش از تونل است. این شاخص رابطه عکس با عملکرد ماشین حفاری دارد



شکل ۶. رابطه شاخص تأخیرات با ضریب بهره‌وری ماشین حفاری در پروژه

سرعت چرخش کاترهد و نیروی رانش Thrust کاهش یافته که منجر به افت شدید نرخ نفوذ می‌شود در حالیکه ضریب بهره‌وری ماشین به دلیل افزایش زمان حفاری، رشد چشمگیری می‌یابد (تاجیک، ۱۳۸۹). ولیکن DTI بر خلاف ضریب بهره‌وری به دلیل اینکه بر پایه توقفات حفاری بنا شده، می‌تواند به تنهایی بیانگر روزهای کارکرد ماشین باشد. این موضوع را می‌توان به صورت شکل ۷ نشان داد.

مزیت استفاده از شاخص تأخیرات در ارزیابی عملکرد TBM را می‌توان در دوره‌های کارکرد ماشین حفاری در هر بخش از تونل مشاهده کرد. اگر روزهای کارکرد ماشین حفاری در هر بخش به عنوان معیاری جهت سنجش عملکرد TBM در نظر گرفته شود ملاحظه می‌شود که ضریب بهره‌وری رابطه دقیقی با دوره حفاری ندارد زیرا لازم است تأثیر نرخ نفوذ در هر بخش آورده شود. به طور مثال جهت عبور ایمن از توده‌سنگهای خردشده و ریزشی پارامترهای حفاری از جمله



شکل ۷. رابطه دوره کارکرد ماشین حفاری با DTI و U

* در این تونل از پارامترهای زمین شناسی مؤثر بر عملکرد TBM، شرایط آب زیرزمینی بیشترین تسلط را بر سیستم دارد. پس تغییرات نشت آب نسبت به سایر پارامترهای زمین شناسی، اثر بیشتری در زمان سایر پارامترها و در نتیجه در ضریب بهره وری دارد.

* بررسی تأثیر پارامترها در ماتریس اندرکنش نشان می دهد که نبود خدمات فنی (P11) بیشترین تسلط را بر سیستم داشته و افزایش زمان این پارامتر می تواند منجر به کاهش چشمگیری در عملکرد TBM شود.

* این تحقیق نشان می دهد که شاخص تأخیرات می تواند به عنوان پارامتری جهت مقایسه عملکرد ماشین های حفاری در پروژه های متفاوت استفاده شود. مزیت این پارامتر در این است که می توان با افزایش DTI دلایل افزایش تأخیرات را کنترل کرد و مشکلات رخ داده را برای مترها بعدی مرتفع ساخت.

شکل فوق نشان می دهد که با کاهش ضریب بهره وری، دوره کارکرد ماشین حفاری افزایش می یابد ولی ضریب همبستگی پایین ($r^2=0/413$) نشان دهنده پراکندگی نتایج در این تحقیق است. این در حالی است که با استفاده از روش شاخص تأخیرات، ضریب همبستگی مناسب ($r^2=0/876$) حاصل می شود.

۷. نتیجه گیری

* افزایش ضریب بهره وری تحت تأثیر زمان صرف شده در هر پارامتر می باشد. بنابراین به منظور رسیدن به ضریب بهره وری پیش بینی شده لازم است که میزان تأخیرات کاهش یابد. یکی از ساده ترین و کم هزینه ترین روش ها برای دسترسی به ضریب بهره وری بالا، شناخت نحوه اندرکنش تأخیرات با روش ماتریسی است.

منابع

- تاجیک، م.، اروجی، م.، نوین، آ.، ۱۳۸۹. بررسی عملکرد ماشین حفاری مکانیزه (TBM) در حفاری قطعه اول تونل انتقال آب کرج - تهران. مجله انجمن زمین شناسی مهندسی ایران، جلد سوم، شماره ۱ و ۲.

- فروغ، ا.، ترابی، ر.، رمضان زاده، ا.، S. Yagiz، ۱۳۹۰. تأثیر شرایط توده سنگ بر توقفات TBM در تونل انتقال آب کرج. نخستین همایش آسیایی و نهمین همایش ملی تونل.
- موسسه مهندسی مشاور ساحل، ۱۳۸۹. گزارش زمین شناسی مسیر تونل.
- موسسه مهندسی مشاور ساحل، ۱۳۸۸. مطالعات هیدروژئولوژی مسیر تونل.
- یاوری، ف.، منصوری، ح.، ابراهیمی فرسنگی، م.، ۱۳۹۰. تعیین نرخ پیشروی TBM به روش سیستم های مهندسی سنگ. نخستین همایش آسیایی و نهمین همایش ملی تونل.
- یعقوبی، ه.، ۱۳۸۹. پیش بینی عملکرد TBM با روش سیستم های مهندسی سنگ. پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه باهنر کرمان.
- Abd Al-Jalil, Y. Q., 1998. Analysis of Performance of Tunnel Boring Machine-Based System. PhD Thesis, the University of Texas.
- Barton, N., 1999. TBM Performance Estimation in Rock Using QTBM. Tunnel & Tunneling International, No. 9.
- Barton, N., 2000. TBM Tunneling in Jointed and Faulted Rock. A. A. Balkema Publisher: Rotterdam, Brookfield, Holland.
- Benardos, A.G., Kaliampakos, D.C., 2004. Modelling TBM Performance with Artificial Neural Networks. Tunnelling and Underground Space Technology: Vol. 19: 597-605.
- Bieniawski Z. T., Celada B., Galera J. M., 2007. TBM Excavability: Prediction and Machine - Rock Interaction. RETC, Toronto, 1118p.
- Bieniawski Z. T., 2007b. Predicting TBM Excavability. Tunnel & Tunnelling International.
- Bruland, A, 1998. Drillability Test Method: Hard Rock Tunnel Boring Machine. PhD Thesis, Trondheim, Norwegian University of Science and Technology, NTNU, Vol. 8 of 10.
- Bruland, A, 1998b. Advance Rate and Cutter Wear: Hard Rock Tunnel Boring Machine. PhD Thesis, Trondheim, Norwegian University of Science and Technology, NTNU, Vol. 3 of 10.
- Ceryan N., Ceryan S., 2008. An Application of The Interaction Matrices Method for Slope, Failure Susceptibility Zoning: Dogankent settlement area (Giresun, NE Turkey). Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 67(3): 375.
- Farmer, IW, Glossop, NH, 1980. Mechanics of Disc Cutter Penetration. Tunnels and Tunneling, 12(6): 22-25.
- Frough O., Torabi S. R., Yagiz S., Tajik M., 2012. Effect of Rockmass Conditions on TBM Utilization Factor in Karaj – Tehran Water conveyance tunnel, World Tunneling Congress, Thailand.
- Gansser A., Huber H., 1962. Geological Observation in the Central Elburz: Iran. Schweizerische Mineralogische Und Petrographische Mitteilungen, 42p.
- Gong, Q. M., Zhao, J., Jiao, Y. Y., 2004. Numerical Modeling of the Effects of Joint Orientation on Rock Fragmentation by TBM Cutters. Tunnelling and Underground Space Technology, 20 (2): 183-191.
- Gong, Q. M., Jiao, Y. Y., Zhao, J, 2005. Numerical Modelling of The Effects of Joint Spacing on Rock fragmentation by TBM cutters. Tunnelling and Underground Space Technology, 21 (1): 46-55.
- Graham, PC, 1976. Rock Exploration for Machine Manufactures. Proceedings Symposium on Exploration for Rock Engineering, Johannesburg, South Africa, pp173-180.
- Hassanpour, J., Rostami, J., Khamechian, M., Tavakoli, H.R., 2010. TBM Performance Analysis in Pyroclastic Rocks: Case History of Karaj Water Conveyance Tunnel. Journal of Rock mechanics and Rock Engineering, 4: 427-445.
- Hudson, J. A., 1992. Rock Engineering Systems: Theory and Practice. Ellis Horwood, Chichester.
- Hudson, J.A., Harrison, J.P., 1997. Engineering Rock Mechanics: an Introduction to the Principles. pergamon, PP. 223-235.
- Innaurato, N. et al., 1991. Forecasting and Effective TBM Performances in a Rapid Excavation of a Tunnel in Italy. Proceeding of 7th International Congress on Rock Mechanics, Aachen, Germany, pp. 1009-1014.
- Khalukakei, R., zare naghadehi, M., 2009. The Analysis and Classification of Rock Slopes Instability Potential in Khosh – Yeylagh Mountainous Road Using Systems Approach. Journal of Iranian Association of Engineering Geology, 2(1, 2).
- Kim, T., 2004. Development of a Fuzzy Logic Based Utilization Predictor Model for Hard Rock Tunnel Boring Machines. PhD Thesis, Colorado School of Mines.

- Laughton, C., 1998. Evaluation and Prediction of Tunnel Boring Machine Performance in Variable Rock Masses. PhD Thesis, The University of Texas.
- Nelson, P., O'Rourke, T.D., Kulhawy, F.H., 1983. Factors Affecting TBM Penetration Rates in Sedimentary Rocks. 24th U.S. Symposium on Rock Mechanics, USA.
- Palmstrom, A., 1994. RMI Parameters Applied in Prediction of Tunnel Boring Penetration: A Rock Mass Characterization for Rock Engineering Purposes PhD thesis, Norway.
- Ramezanzadeh, A., 2002. Performance Prediction Models for Hard Rock Tunnel Boring Machines. The 6th Iranian Tunneling Conference.
- Rostami, J., Ozdemir, L., 1993. A New Model for Performance Prediction of Hard Rock TBMs. RETC conference proceedings, Boston.
- Rostami, J., Ozdemir, L., Nilson, B., 1997. Comparison between CSM and NTH Hard Rock TBM Performance Prediction Models. Colorado Scholl of Mines, Golden, Colorado, USA.
- Roxborough FF, Phillips HR, 1975. Rock Excavation by Disc Cutter. International journal of Rock Mechanic and Mining Sciences, 12: 361-366.
- Rozos, D. et al., 2008. An Implementation of Rock Engineering System for Ranking the Instability Potential of Natural Slopes in Greek Territory: An Application in Karditsa County. Landslides journal, Vol. 5: 261-270.
- Sadeghi, M., rasouli, V., 2005. Evaluation of Stability of Underground Opening with Rock Engineering Systems (RES). the 7th Proceeding of Iranian Mining Engineering Conference.
- SAHEL Consultant Engineers Institute, 2009. Engineering Geology Report of Karaj-Tehran Water Conveyance Tunnel (Lot 2). SCE Archive.
- SAHEL Consultant Engineers Institute, 2009 to 2011. Engineering Geology As built Maps and Site Reports of Conveyance Tunnel (Lot 2). SCE Archive.
- Sapigni, M., Berti, M., Bethaz, E., Busillo, A., Cardone, G., 2002. TBM Performance Estimation Using Rock Mass Classification. International Journal of Rock Mechanic and Mining Sciences, Vol. 39.
- Sanio, H.P. 1985. Prediction of the Performance of Disc Cutters in Anisotropic Rock. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics, 22(3): 153-161.
- Sato, K., Gong F., Itakura, K., 1991. Prediction of Disc Cutter Performance Using a Circular Rock Cutting Ring. 1st International Mine Mechanization and Automation Symposium, Colorado School of Mines, USA.
- Sharp, W. R., Kennedy, E. R., Little, W. E., 1983. Estimating Tunneling Costs Using an Interactive Computer Model. RETC, Chicago.
- Snowdon, A., R., Ryley D., M., Temporal, J., 1982. Study of Disc Cutting in Selected British Rocks. International Journal of Rock Mechanics and Mining Science & Geomechanics, 19(3): 107-121.
- Tarkoy, P.J., 1973. Predicting TBM Penetration Rates in Selected Rock Types. Ninth Canadian Symposium on Rock Mechanics, Montreal, Canada.
- Tarkoy, P.J., 1975. Rock Hardness Index Properties and Geotechnical Parameters for Predicting Tunnel Boring Machine Performance. PhD thesis, University of Illinois at Urbana-Champaign, Illinois, USA, 326p
- Yagiz, S., 2007. Utilizing Rock Mass Properties for Predicting TBM Performance in Hard Rock Condition. Tunnelling and Underground Space Technology, 23: 326-339
- Zare naghadehi, M., 2012. The Assessment of Rock Slope Instability along the Khosh-Yeylugh Main Road (Iran) Using a Systems Approach. Environmental Earth Sciences, 67 (3): 665.
- Zhang L. Q., Yang, Z.F., Liao Q.L., Chen J., 2004. An Application of the Rock Engineering System (RES) Methodology to Rockfall Hazard Assessment on the Chengdu-Lhasa Highway: China. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 41 (3): 526-527.